

УДК 666.973.2

## СТЕПЕНЬ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ НА ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПЛИТ ИЗ ОЧЕСОВ ЛЬНА

**С.А. РОМАНОВСКИЙ**; канд. техн. наук, доц. **А.А. БАКАТОВИЧ**  
(Полоцкий государственный университет)

Установлены основные факторы, оказывающие наибольшее влияние на физико-механические характеристики теплоизоляционных плит на основе очесов волокна льна. Приведена технология получения образцов для определения физико-механических показателей утеплителей. Предложена методика по исследованию водостойкости волокнистых теплоизоляционных материалов. Реализован трехфакторный эксперимент по плану Бокса. По итогам эксперимента получены полиномиальные модели давления формования, коэффициента теплопроводности, предела прочности на сжатие при 10%-ной деформации, водостойкости теплоизоляционных материалов из льняных очесов. Для анализа полученных результатов построены однофакторные графики влияния изменения переменных на свойства материала. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что средняя плотность оказывает наибольшее влияние на давление формования, показатель теплопроводности и прочность на сжатие, а количество добавки в общем расходе вяжущего – на водостойкость материала.

**Ключевые слова:** теплоизоляционные плиты, очесы льна, жидкое натриевое стекло, известь, гипс.

**Введение.** Отрасль строительных материалов в настоящее время ориентируется на создание новых эффективных утеплителей, что обусловлено стратегией энергосбережения в условиях повышения цен на энергетические ресурсы. Технологии по утилизации отходов растениеводства для стеновых и теплоизоляционных материалов реализуются во многих странах, что указывает на значительный интерес и востребованность данного направления в строительной отрасли. Существенный сегмент в производстве агропромышленного комплекса Республики Беларусь занимает растениеводство, включая выращивание льна. Так, в Беларуси сосредоточено более 20% льняных посевов на Европейском континенте. В 2017 году урожайность льноволокна составила 9,2 ц/га, наибольшая урожайность отмечалась в 2014 году – 10,7 ц/га [1].

Сбор урожая и дальнейшая переработка льна для получения волокон – достаточно трудоемкий процесс. При уборке льна комбайнами производится механизированный расстил соломки на льнище. Отделению волокнистой части стебля от древесины способствует роса, дожди и тепло, разрушающие соединительные ткани. Далее льняное сырье поступает на льнозаводы для первичной переработки льна [2]. При обработке льняной тресты свыше одной трети всего волокна уходит в отходы трепания. После обычного протряхивания от костры часть отходов используется как пакля. Большую часть отходов тщательно обрабатывают в потоке на специальной линии машин по производству короткого волокна, состоящей из специальной сушилки, трясилки, куделеприготовительной машины. Здесь льняные отходы окончательно очищают от древесины. Для повышения качества волокна чистое короткое и длинное волокно после оценки и подвязки отвозят на склад для отлежки. Затем волокно проходит контрольную сортировку и отправляется на льняные комбинаты или фабрики [3]. В результате чесания трепаного льна получают от 45 до 55% чесаного льна, 40...50% очесов и около 5% костры.

В настоящее время в Полоцком государственном университете в лабораториях кафедры строительного производства проводятся исследования по определению физико-механических характеристик теплоизоляционных материалов с заполнителем из очесов волокна льна. Основные физико-механические показатели утеплителей на основе льняных очесов приведены в научных работах [4; 5] Теплоизоляционные плиты на основе данного заполнителя, включающие натриевое жидкое стекло и добавки из извести и гипса, являющиеся экологически чистыми и безопасными для жизнедеятельности человека. Применение льняных очесов для изготовления плит решает проблему утилизации растительных отходов льнопереработки и расширяет номенклатуру эффективных утеплителей из льняных волокон наравне с такими производимыми в Беларуси и России теплоизоляционными материалами, как «Экотерм», «Экотеплин» [6–8].

**Методика эксперимента.** Основной комплекс исследований по определению физико-механических характеристик теплоизоляционных плит проводился на заполнителе из очесов льна. В качестве вяжущего использовали натриевое жидкое стекло с добавками из извести и гипса. При изготовлении исследуемых образцов соблюдали определенную последовательность выполнения технологических операций. Предварительно производили дозировку компонентов. После чего в жидкое стекло вводили известь, перемешивая до однородной консистенции, затем добавляли гипс. В результате перемешивания модифицированного жидкого стекла льняными очёсами и формовки получали экспериментальные образцы теплоизоляционного материала. Образцы выдерживали в форме 6 часов при температуре  $20 \pm 2$  °С, затем высушивали в течение 4 часов в сушильном шкафу при температуре 45...55 °С.

Среднюю плотность и теплопроводность определяли согласно ГОСТ 17177 [9] и СТБ 1618 [10] соответственно на образцах-плитах размером 250×250×30 мм. Прочность на сжатие при 10%-ной деформации исследовали на образцах-кубах размером 100×100×100 мм по ГОСТ 17177 [9].

Водостойкость теплоизоляционного материала определяли на образцах-кубах размером 100×100×100 мм. За основу принята методика, приведенная в испытаниях Н.В. Давыденко [11]. Отформованные образцы высушивали при температуре 20±2 °С, а по достижении постоянной массы охлаждали и полностью погружали в воду. Температуру воды в емкости поддерживали в пределах 18±2 °С.

Через 2 часа образцы извлекали из емкости. Для удаления излишков воды образцы-кубы помещали на металлическое сито диаметром 1,25 мм на 15 минут. Затем образцы помещали в сушильный шкаф и по достижении постоянной массы взвешивали. Далее кубы вновь погружали в емкость с водой, высушивали и взвешивали. Количество опытов определялось постоянством массы трех последовательно высушенных образцов утеплителя. Изменение массы кубов выражали в процентах. Относительный показатель водостойкости теплоизоляционного материала определяли по величине изменения массы образцов-кубов в сухом состоянии (до начала эксперимента) и после высушивания (после проведения исследования).

**Результаты и обсуждение.** По результатам комплексных исследований установлено, что основными факторами, оказывающими наибольшее влияние на физико-механические характеристики разработанных теплоизоляционных плит на основе очесов льна, являются плотность утеплителя, расход вяжущего и количество добавки. Установленные в результате исследований границы варьирования факторов для плит из очесов льна позволили реализовать трехфакторный эксперимент по плану Бокса ( $n_0 = 1$ ). Факторы и интервалы варьирования представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование факторов	Единицы измерения	Обозначения в кодированных переменных	Уровни факторов			Интервалы варьирования факторов
			-1	0	+1	
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	$X_1$	40	80	120	40
Расход вяжущего	массовая доля	$X_2$	0,08	0,14	0,2	0,06
Количество добавки в общем расходе вяжущего	массовая доля	$X_3$	0,06	0,1	0,14	0,04

Обработка опытных данных выполнена методом регрессионного анализа с применением программы «Statistica» [12]. Произведенная проверка значимости найденных коэффициентов регрессии позволила получить полиномиальные модели давления формования, коэффициента теплопроводности, предела прочности на сжатие при 10%-ной деформации, водостойкости теплоизоляционных плит из очесов волокна льна. Полиномиальные модели выходных величин в кодированных переменных имеют следующий вид:

- *давление формования:*

$$Y_1 = 0,354 + 0,265 \cdot X_1 - 0,028 \cdot X_2 - 0,018 \cdot X_1 \cdot X_2; \quad (1)$$

- *коэффициент теплопроводности:*

$$Y_2 = 0,0373 + 0,0008 \cdot X_1 + 0,0017 \cdot X_2 + 0,005 \cdot X_1^2 + 0,0009 \cdot X_1 \cdot X_2; \quad (2)$$

- *предел прочности на сжатие при 10%-ной деформации:*

$$Y_3 = 0,2675 + 0,142 \cdot X_1 + 0,019 \cdot X_2 + 0,005 \cdot X_3 - 0,0175 \cdot X_1^2 + 0,01 \cdot X_1 \cdot X_2; \quad (3)$$

- *водостойкость:*

$$Y_4 = 94,02 + 0,54 \cdot X_1 + 0,31 \cdot X_2 + 4,67 \cdot X_3 - 0,42 \cdot X_1^2 - 2,17 \cdot X_3^2 + 0,29 \cdot X_1 \cdot X_2. \quad (4)$$

Для установления степени влияния факторов на выходные параметры (давление формования, коэффициент теплопроводности, предел прочности на сжатие при 10%-ной деформации, водостойкость) построены однофакторные графики влияния изменения переменных на свойства материала при нулевых значениях остальных факторов и нулевом значении свободного члена уравнения. Зависимости влияния изменения факторов на исследуемые выходные параметры приведены на рисунках 1–4.

Анализ графика влияния переменных на давление формования (рисунок 1) показал, что с повышением средней плотности ( $X_1$ ) и уменьшением расхода вяжущего ( $X_2$ ) исследуемый выходной параметр ( $Y_1$ ) увеличивается по линейному закону. Наибольшее влияние факторов наблюдается при граничных условиях. При этом плотность ( $X_1$ ) оказывает наибольшее влияние на давление формования ( $Y_1$ ), а расход вяжущего ( $X_2$ ) – наименьшее.

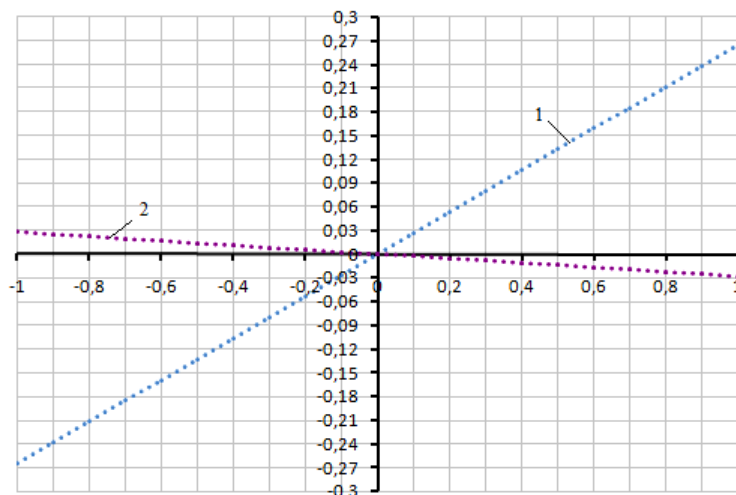


Рисунок 1. – Изменение давления формования по однофакторным моделям влияния средней плотности (1), расхода вяжущего (2)

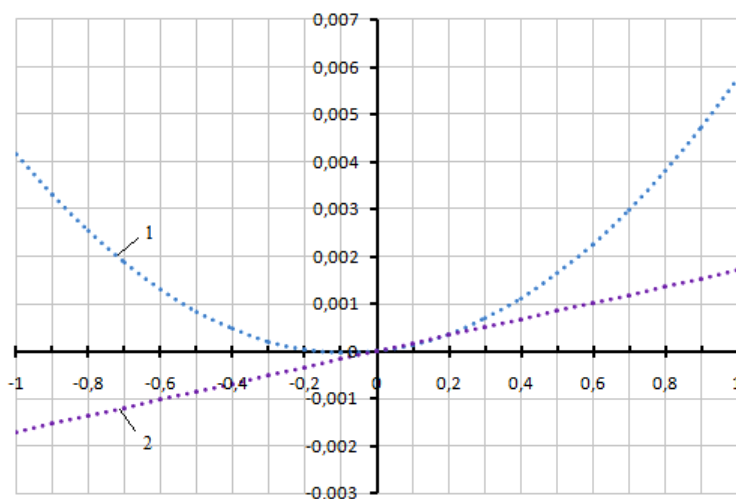


Рисунок 2. – Изменение коэффициента теплопроводности по однофакторным моделям влияния средней плотности (1), расхода вяжущего (2)

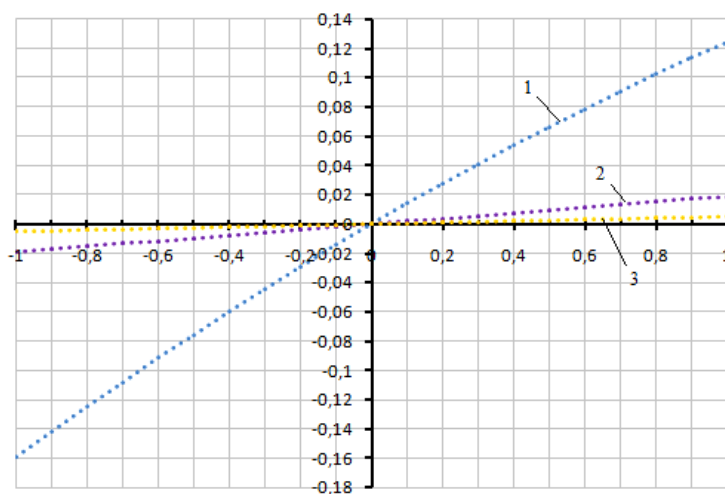


Рисунок 3. – Изменение прочности на сжатие при 10%-ной деформации по однофакторным моделям влияния средней плотности (1), расхода вяжущего (2), количества добавки в общем расходе вяжущего (3)

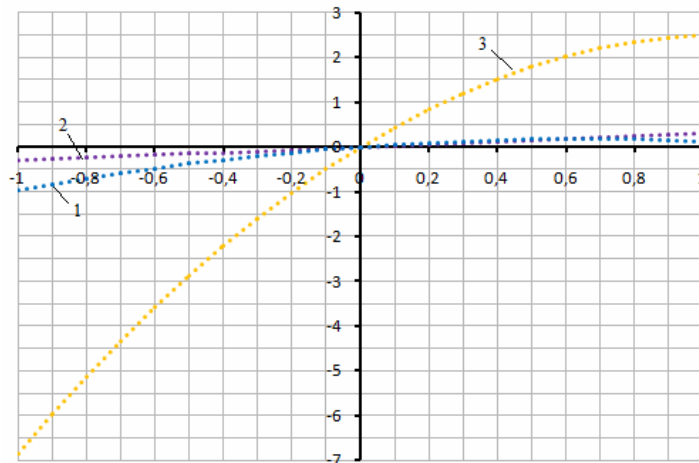


Рисунок 4. – Изменение водостойкости по однофакторным моделям влияния средней плотности (1), расхода вяжущего (2), количества добавки в общем расходе вяжущего (3)

Из приведенного графика влияния факторов ( $X_1$ ) и ( $X_2$ ) на коэффициент теплопроводности ( $Y_2$ ) (см. рисунок 2) следует, что увеличение расхода вяжущего ( $X_2$ ) оказывает отрицательное влияние на параметр ( $Y_2$ ) и приводит к линейному изменению теплопроводности ( $Y_2$ ). Наибольшее влияние из двух факторов на показатель теплопроводности ( $Y_2$ ) оказывает средняя плотность ( $X_1$ ). В зависимости от величины входной переменной ( $X_1$ ) коэффициент теплопроводности ( $Y_2$ ) изменится по параболическому закону. В диапазоне изменения фактора ( $X_1$ ) от  $-1$  до  $-0,1$  величина теплопроводности ( $Y_2$ ) уменьшается, а в диапазоне от  $-0,1$  до  $+1$  значение теплопроводности ( $Y_2$ ) повышается. Из условия необходимости снижения выходного параметра ( $Y_2$ ) удовлетворяющая требованию величина средней плотности ( $X_1$ ) находится в диапазоне от  $-0,3$  до  $+0,1$  изменения фактора ( $X_1$ ).

Анализ графика влияния входных переменных на показатель прочности при 10%-ной деформации (см. рисунок 3) можно сделать вывод о том, что увеличение средней плотности ( $X_1$ ), расхода вяжущего ( $X_2$ ), количества добавки в общем расходе вяжущего ( $X_3$ ) приводит к повышению прочности ( $Y_3$ ). Причем фактор ( $X_1$ ) оказывает наибольшее влияние из всех трех факторов на увеличение прочностных характеристик материала. Прирост входных переменных ( $X_2$ ) и ( $X_3$ ) приводит к линейному повышению показателя прочности на сжатие при 10%-ной деформации ( $Y_3$ ).

Полученный график изменения водостойкости от трех факторов (см. рисунок 4) свидетельствует о том, что увеличение расхода вяжущего ( $X_2$ ) и количества добавки ( $X_3$ ) приводит к возрастанию величины выходного параметра ( $Y_4$ ). Повышение водостойкости происходит по линейной зависимости при увеличении переменной ( $X_2$ ). Прирост выходного параметра ( $Y_4$ ) наблюдается при повышении факторов ( $X_1$ ) и ( $X_3$ ) по параболической зависимости с экстремумом в точке  $+1$  при изменении количества добавки в общем расходе вяжущего ( $X_3$ ) и в точке  $+0,6$  при изменении средней плотности ( $X_1$ ). При этом наибольшее влияние на водостойкость материала ( $Y_4$ ) оказывает фактор ( $X_3$ ).

Совместный анализ полученных графиков позволил выявить следующие зависимости:

- *увеличение средней плотности ( $X_1$ )* приводит к повышению давления формования, прочности на сжатие при 10%-ной деформации по линейной зависимости, водостойкости материала по параболической кривой с экстремумом в точке  $+0,6$ , при этом коэффициент теплопроводности уменьшается по параболической зависимости с экстремумом в точке  $-0,1$ ;

- *возрастание фактора ( $X_2$ )* приводит к увеличению значений выходных параметров ( $Y_2$ ), ( $Y_3$ ), ( $Y_4$ ), при этом давление формования ( $Y_1$ ) снижается. Влияние расхода вяжущего ( $X_2$ ) на все исследуемые параметры происходит по линейному закону. При повышении количества добавки в общем расходе вяжущего ( $X_3$ ) наблюдается увеличение прочности на сжатие по линейной зависимости и водостойкости материала по параболической кривой с экстремумом в точке  $+0,6$ . Следует отметить что наибольшее влияние на среднюю плотность ( $Y_1$ ), расход вяжущего ( $Y_2$ ), прочность на сжатие при 10%-ной деформации ( $Y_3$ ) оказывает средняя плотность ( $X_1$ ), а на водостойкость материала ( $Y_4$ ) переменный параметр ( $X_3$ ).

Таким образом, из анализа полученных данных следует, что давление формования напрямую зависит от средней плотности теплоизоляционных плит. Утеплитель, характеризующийся минимальной плотностью, обладает рыхлой волокнистой структурой со значительным количеством пустот, в том числе и сквозных. При повышении количества волокнистого заполнителя необходимо большее давление формования для уплотнения материала. Максимальное давление обеспечивает минимальную пустотность в виде отдельных локализованных микропустот в материале за счет увеличения количества и общей пло-

шади точек контакта между очесами льна в результате сближения волокон и более плотного прилегания друг к другу. Уменьшение давления формования при возрастании плотности в связи с увеличением расхода вяжущего обусловлено снижением жесткости структурного каркаса из льняных очесов, вызванное смачиваемостью волокон водой, содержащейся в вяжущем, что приводит к развитию временной пластичности и гибкости очесов волокна льна.

Значительное влияние на теплоизолирующую способность материала оказывает средняя плотность и расход вяжущего. Перенос потоков воздуха при малой плотности утеплителя связан с образованием сетчатой структуры со сквозными пустотами по причине недостаточно плотного прилегания волокон друг к другу. Постепенное уменьшение теплопроводности с возрастанием средней плотности за счет увеличения количества заполнителя обусловлено повышением количества соприкосновений волокон между собой, что приводит к снижению объема и размеров пустот с одновременной локализацией на отдельные замкнутые микропространства, не сообщающиеся друг с другом. При этом в замкнутых микропространствах отсутствует циркуляция воздуха. Дальнейший прирост плотности приводит к постепенному повышению коэффициента теплопроводности в результате образования плотной, жесткой структуры с минимальным количеством микропустот и возрастающим количеством не точечных, а сплошных контактов между волокнами. Приращение плотности при повышении расхода вяжущего оказывает отрицательное влияние на теплопроводность материала из-за увеличения толщин оболочек из натриевого жидкого стекла, которые покрывают волокна, вследствие чего проводится большее количество тепла. Постепенно утолщенные оболочки начинают выполнять функцию мостиков холода на микроуровне.

Низкие прочностные характеристики при небольшой плотности материала объясняются формированием рыхлой сетчатой волокнистой структуры, содержащей большой объем пустот и малым количеством контактных точек между волокнами. Прирост прочности при возрастании средней плотности обусловлен образованием более плотной структуры материала по причине повышения расхода заполнителя, что влечёт за собой приращение количества и увеличение общей площади точек контакта между волокнами. Повышение прочности при увеличении расхода натриевого жидкого стекла вызвано приращением жесткости волокнистого каркаса, в частности каждого волокна за счёт формирования узловых клеевых соединений с большим содержанием вяжущего в контактных точках и увеличения толщины оболочек, выполняющих функцию армирующего слоя относительно волокнистой структуры.

При погружении в емкость с водой в структуре образцов утеплителя постепенно происходит растворение натриевого жидкого стекла. Потеря прочности объясняется уменьшением толщины с последующим полным растворением оболочек из жидкого стекла вокруг волокон, а также в результате разрушения узловых клеевых соединений из вяжущего в контактных точках. В процессе водонасыщения и растворения натриевого жидкого стекла удерживает в своей структуре воду, что отрицательно сказывается на теплоизолирующей способности теплоизоляционного материала. Добавки из извести и гипса препятствуют растворению жидкого стекла, образуя водостойкое модифицированное вяжущее, что предотвращает разрушение и сохраняет физико-механические характеристики утеплителя на основе очёсов льна.

**Закключение.** По результатам исследований установлено, что на основе очёсов волокна льна возможно получить теплоизоляционные плиты при давлении формования  $0,1 \dots 0,67 \cdot 10^{-2}$  МПа плотностью  $40 \dots 120$  кг/м<sup>3</sup>, обладающие коэффициентом теплопроводности  $0,035 \dots 0,046$  Вт/(м·°С), прочностью на сжатие при 10%-ной деформации  $0,1 \dots 0,43 \cdot 10^{-2}$  МПа и водостойкостью 85...96%.

Однофакторные графики влияния изменения переменных на свойства материала, построенные по полиномиальным моделям, позволили установить общие зависимости влияния факторов на основные показатели теплоизоляционных плит. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что прирост плотности приводит к увеличению давления формования, прочности на сжатие при 10%-ной деформации по линейному закону и снижению коэффициента теплопроводности по параболической зависимости. С возрастанием расхода вяжущего по линейной зависимости уменьшается давление формования и повышается теплопроводность, прочность на сжатие и водостойкость. Приращение количества добавки в общем расходе вяжущего приводит к увеличению прочности по линейному закону и водостойкости материала по параболической кривой.

Из анализа полиномиальных моделей следует, что наибольшую степень влияния на давление формования, показатель теплопроводности, прочность на сжатие при 10%-ной деформации оказывает средняя плотность, а на водостойкость – количество добавки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Цыганов, А.Р. Современное состояние растениеводства Республики Беларусь / А.Р. Цыганов, Л.А. Веремейчик // Научные инновации – аграрному производству : материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию юбилею Омского ГАУ, Омск, 21 февр. 2018 г. / Омский гос. аграр. ун-т им. П.А. Столыпина, 2018. – С. 515–520.

2. Живетин, В.В. Лён. Вчера, сегодня, завтра / В.В. Живетин, Л.Н. Гинзбург, А.И. Рыжов. – М. : Колос, 1967. – 29 с.
3. Рогаш, А.Р. Льноводство / А.Р. Рогаш, Н.Г. Абрамов, Я.А. Лебедев. – М. : ИПО Пилиграм, 1995. – 544 с.
4. Romanovskiy, S. Influence of the Fibrous Structure on the Physical and Mechanical Characteristics of Insulating Slabs from Flax Noils / S. Romanovskiy, A. Bakatovich // Construction Science : Scientific Journal of Riga Technical University. – 2017. – Vol. 20. – P. 10–16.
5. Romanovskiy, S. Noils of flax fiber as a aggregate for heat-insulating plates / S. Romanovskiy, N. Davydenko // European and dimension in research : Electronic collected materials of IX junior researchers conference, 26–27 april, 2017. – P. 101–103.
6. Плиты теплоизоляционные звукопоглощающие. Технические условия : ТУ ВУ 391129716.001-2015. – Введ. 27.07.2015. – Ореховск, 2015. – 10 с.
7. Советников, Д.О. Оптимальная толщина утеплителя наружной стены для создания энергоэффективного и экологичного здания в условиях Санкт-Петербурга / Д.О. Советников, Д.О. Семашкина, Д.В. Баранова // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 12 (51). – С. 7–19.
8. Красимова, С.С. Обзор биопозитивных строительных материалов, применяемых при строительстве экодому / С.С. Красимова, В.А. Малышева, Д.Н. Рожкова // Masters journal. – 2014. – С. 363–369.
9. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний : ГОСТ 17177-94. – Введ. 22.08.1995. – Минск : Минстройархитектуры, 1996. – 56 с.
10. Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме : СТБ 1618-2006. – Введ. 24.03.2006. – Минск : Минстройархитектуры. – 2006. – 9 с.
11. Давыденко, Н.В. Повышение водостойкости жидкого стекла, применяемого в качестве вяжущего при производстве теплоизоляционных костросоломенных плит / Н.В. Давыденко, А.А. Бакатович // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 8. – С. 71–75.
12. Вознесенский, В.А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков. – К. : Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 328 с.

Поступила 21.12.2018

# DEGREE OF INFLUENCE OF FACTORS ON BASIC PHYSICAL AND MECHANICAL INDICATORS OF THERMAL INSULATING PLATES FROM FLAX NOILS

S. ROMANOVSKIY, A. BAKATOVICH

*The main factors that have the greatest influence on the physic-mechanical characteristics of heat insulating plates based on flax fiber noils have been established. The technology of obtaining samples to determine the physico-mechanical parameters of insulation. The proposed method for the study of water resistance of fibrous insulation materials. Implemented a three-factor experiment according to the plan of Box. According to the results of the experiment, polynomial models of molding pressure, thermal conductivity coefficient, compressive strength at 10% deformation, water resistance of heat-insulating materials from linen noil were obtained. To analyze the results obtained, single-factor graphs of the effect of changing variables on the material properties are plotted. The results of the studies indicate that the average density has the greatest impact on the molding pressure, thermal conductivity and compressive strength, and the amount of additive in the total binder consumption on the water resistance of the material.*

**Keywords:** heat insulation plates, flax noil, liquid sodium glass, lime.